

## Список литературы

1. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. – М.: Высш. шк., 1984.
2. Горение и течение в агрегатах энергоустановок: моделирование, энергетика, экология /В.Г. Крюков, В.И. Наумов, А.В. Демин, А.Л. Абдуллин, Т.В. Тринос. – М.: «Янус-К», 1997.
3. Кондратьев В.Н. Константы скоростей газофазных реакций: Справочник. – М.: Наука, 1974.

## МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОДИНАМИКЕ ТЕЛА ПЕРЕМЕННЫХ МАССЫ И СОСТАВА

Егорычев В.С.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Объектом настоящего термодинамического исследования является рабочее тело переменной массы и переменного химического состава, например, продукты сгорания в камере ракетных двигателей или агрегатов и энергетических установок, где протекают физико-химические процессы при высоких температурах, сопровождаемые различного рода неравновесными эффектами.

Способ построения замкнутой поверхности, ограничивающей рабочее тело, совершенно произволен. В каждом конкретном случае он определяется задачами исследования, удобством и простотой построения математической модели процесса и оперирования этой моделью. Все, что расположено вне его границ, представляет собой окружающую среду, с которой рабочее тело обменивается массой, т.е. различными исходными веществами, и энергией.

Масса и состав выделенного таким образом рабочего тела изменяются из-за прихода через контрольную поверхность, ограничивающую рабочее тело, исходных веществ, перемещения действующих элементов рабочего тела за его пределы, а также поступления компонентов с поверхности горения, испарения или сублимации жидких и твердых топлив, расположенных внутри полости. Конденсированные вещества, находящиеся в пределах контрольной поверхности, не включаются в состав рабочего тела.

Изменение массы рабочего тела обусловлено приходом через контрольную поверхность и расходом вещества. Приход вещества вызывает увеличение массы рабочего тела, а расход – уменьшение. Приход вещества может быть внешним и внутренним. При внутреннем приходе вещества образуются в рабочей полости, т.е. внутри выделенной контрольной поверхностью объема, из продуктов, находящихся там в конденсированном

состоянии. При внешней миграции исходное вещество поступает в рабочую полость извне по приходным каналам.

Исходное вещество может быть однокомпонентным или же представлять собой совокупность различных по химическому составу и отдельно хранимых веществ. В термодинамике тела переменной массы [1,2] исходное вещество, поступающее по приходным каналам, имеет тот же состав, что и рабочее тело, поэтому состав последнего в исследуемых процессах оставался постоянным. В более общем случае, когда указанное условие не выполняется, происходит изменение состава рабочего тела, которое будем называть расходным или миграционным. Оно вызывается только приходом вещества в контрольный объем.

Кроме приходного возможно изменение химического состава рабочего тела из-за протекания химических реакций между отдельными его компонентами, фазовых и полиморфных превращений. Такое изменение состава рабочего тела будем называть химическим. Оно сопровождается поглощением или выделением тепла, которое необходимо учитывать.

Мигрирующие или расходные элементы – объединяющее название присоединяемых и отделяемых от рабочего тела частиц вещества.

Совокупность действующих элементов представляет собой рабочее тело переменной массы и состава.

Все, что происходит с мигрирующими элементами до включения их в состав действующих элементов и после исключения из их числа, не относится к процессам изменения состояния рабочего тела.

Рабочее тело переменной массы и переменного состава, имеющее  $\ell$  каналов внешнего прихода исходных веществ,  $m$  поверхностей или каналов внутреннего их прихода и  $n$  каналов расхода действующих элементов изображено условно на рис.1.

Для моделирования процессов изменения состояния такого рабочего тела примем следующие допущения:

- рабочее тело – смесь идеальных газов;
- изменение состояния рабочего тела протекает квазистатически;
- состав рабочего тела определяется с учетом кинетики протекающих химических реакций и является неравновесным;
- кулоновское взаимодействие

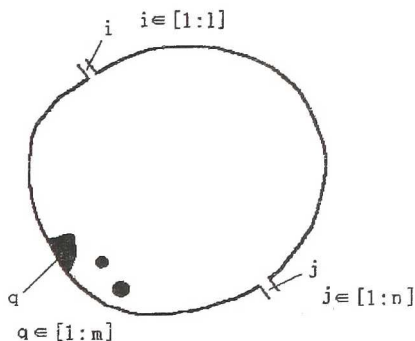


Рис.1. Рабочее тело переменных массы и состава

заряженных частиц в ионизированном рабочем теле отсутствует.

Рабочее тело переменных массы и состава имеет три независимые формы взаимодействия с окружающей средой: механическую, тепловую и расходную и обладает четырьмя энергетическими степенями свободы: контурно-механической, контурно-тепловой, расходной и химической.

В классической термодинамике рассматривают рабочее тело с механической и тепловой формой взаимодействия. Это рабочее тело является более простым физическим объектом, чем рабочее тело, изменяющее свою массу и состав.

Мигрирующие элементы вызывают три взаимосвязанных, но в то же время качественно различных явления: расходную деформацию, расходную теплопередачу и расходное изменение состава.

Расходная деформация – это часть энергетического воздействия на рабочее тело, вызванного переносом вещества. Она проявляется в деформации действующих элементов при поступлении (вталкивании) в рабочий объем и расходе (выталкивании) из него мигрирующих элементов.

Квазистатическое изменение рабочего тела позволяет считать, что процесс перехода мигрирующих элементов в действующие происходит в зоне незначительных размеров, расположенной в непосредственной близости от места или поверхности ввода, т.е. канала ввода. Размерами этой зоны можно пренебречь. Эту зону будем называть зоной воздействия миграции. Тогда внешняя приходная работа тела, т.е. работа внедрения в рабочий объем мигрирующего элемента массой  $dM_{\text{пр.в.}i}$  по  $i$ -му каналу внешний приходной миграции за время  $d\tau$ , или работа сжатия действующих элементов составит [1]

$$dL_{\text{пр.в.}i} = -p \, v \, dM_{\text{пр.в.}i}, \quad (1)$$

где  $p$ ,  $v$  – давление и удельный объем рабочего тела.

В случае внутреннего прихода мигрирующего элемента массой  $dM_{\text{пр.вн.}q}$  с  $q$ -ой поверхности конденсата, имеющего удельный объем  $V_{\text{к.}q}$ , внутренняя приходная работа составит

$$dL_{\text{пр.вн.}q} = -p \left( v - v_{\text{к.}q} \right) dM_{\text{пр.вн.}q}. \quad (2)$$

При расходе рабочего тела массой  $dM_{\text{р.}j}$  по  $j$ -му каналу расходной миграции работа тела составит

$$dL_{\text{р.}j} = p \, v \cdot dM_{\text{р.}j}. \quad (3)$$

Расходная работа тела и его действующих элементов с учетом всех форм и каналов миграции рабочего вещества соответственно запишется



$$dL_p = -p v \left( dM_{\text{пр.в.}} + dM_{\text{пр.вн.}} - dM_p \right) + \\ + p \sum_{q=1}^m v_{\kappa q} dM_{\text{пр.вн.}q}, \quad (4)$$

$$d\ell_p = -p v \left( d\varepsilon_{\text{пр.в.}} + d\varepsilon_{\text{пр.вн.}} - d\varepsilon_p \right) + \\ + p \sum_{q=1}^m V_{\kappa q} d\varepsilon_{\text{пр.вн.}q}. \quad (5)$$

Расходная теплопередача – это та часть энергетического воздействия мигрирующих элементов, которая вызывает изменение внутренней энергии рабочего тела путем теплообмена между мигрирующими и действующими элементами за счет изменения внутренней энергии мигрирующего элемента при его ассимиляции. Обязательным условием протекания расходной теплопередачи является различие температур мигрирующего и действующего элементов. При расходной миграции рабочего тела этого различия нет, поэтому и отсутствует расходная теплопередача.

После совершения расходной миграционной работы за счет своей внутренней энергии мигрирующий элемент внутренней миграции будет обладать следующей удельной внутренней энергией

$$u_{\text{пр.вн.}q} = u_{\text{вн.}q} - \ell_{\text{пр.вн.}q} = i_{\text{вн.}q} - p v_q - p (v_q - v_{\kappa q}), \quad (6)$$

где  $i_{\text{вн.}q}$  – энтальпия вещества, поступающего с  $q$ -ой поверхности внутренней приходной миграции, а  $v_q$  – его удельный объем.

Расходная теплопередача рабочего тела и удельная расходная теплопередача действующего элемента с учетом всех форм, каналов и поверхностей миграции соответственно запишутся

$$dQ_p = dQ_{\text{пр.в.}} + dQ_{\text{пр.вн.}} + dQ_p = \sum_{i=1}^{\ell} (u_{\text{пр.в.}i} - u_i) \times \\ \times dM_{\text{пр.в.}i} + \sum_{q=1}^n (u_{\text{пр.вн.}q} - u_q) dM_{\text{пр.вн.}q}, \quad (7)$$

$$dq_p = \sum_{i=1}^{\ell} (u_{\text{пр.в.}i} - u_i) d\varepsilon_{\text{пр.в.}i} + \sum_{q=1}^n (u_{\text{пр.вн.}q} - u_q) d\varepsilon_{\text{пр.вн.}q}, \quad (8)$$

где  $u_i$  и  $u_q$  – удельные внутренние энергии исходных веществ поступающих по  $i$ -му каналу внешней и  $q$ -му каналу внутренней приходных

миграций соответственно при температуре рабочего тела в данный момент.

Когда рабочее тело представляет собой смесь  $r$  различных газов, то массовая доля  $\varphi$ -ой компоненты запишется

$$q_{\varphi} = \frac{M_{\varphi}}{M}. \quad (9)$$

Продифференцировав последнее выражение по времени, получим

$$\frac{dq_{\varphi}}{d\tau} = \frac{1}{M} \left( \frac{dM_{\varphi}}{d\tau} - q_{\varphi} \frac{dM}{d\tau} \right). \quad (10)$$

Уравнение закона сохранения массы для рассматриваемого рабочего тела имеет вид

$$dM = dM_{\text{пр}} - dM_{\text{р}} = \sum_{i=1}^{\ell} dM_{\text{пр.в.}i} + \sum_{q=1}^m dM_{\text{пр.вн.}q} - \sum_{j=1}^n dM_{\text{р.}j}. \quad (11)$$

Это уравнение второго закона термодинамики тела переменных массы и состава.

Найдя выражения для  $\frac{dM}{d\tau} = \dot{m}$  и  $\frac{dM_{\varphi}}{d\tau} = \dot{m}_{\varphi}$  и подставив их

в уравнение (10), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющую рассчитывать состав рабочего тела при миграционном его изменении.

$$\begin{aligned} \frac{dq_{\varphi}}{d\tau} = \frac{RT}{pV} & \left[ \sum_{i=1}^{\ell} q_{\varphi \text{ пр.в.}i} \cdot \dot{m}_{\text{пр.в.}i} + \sum_{q=1}^m q_{\varphi \text{ пр.вн.}q} \cdot \dot{m}_{\text{пр.вн.}q} - \right. \\ & \left. - q_{\varphi} \left( \sum_{i=1}^{\ell} \dot{m}_{\text{пр.в.}i} + \sum_{q=1}^m \dot{m}_{\text{пр.вн.}q} \right) \right], \quad \varphi \in [1:r-1] \end{aligned} \quad (12)$$

В общем случае рабочее тело в произвольный момент времени может состоять из неравновесных продуктов реакции и еще не прореагировавшей топливной смеси. Рассуждая аналогичным образом, получим дифференциальное уравнение, позволяющее рассчитывать массовую долю неравновесных продуктов химического взаимодействия

$$\frac{dq_{\text{п.р}}}{d\tau} = \frac{RT}{pV} \left[ \dot{m}_{\text{х}} - q_{\text{п.р}} \left( \sum_{i=1}^{\ell} \dot{m}_{\text{пр.в.}i} + \sum_{q=1}^m \dot{m}_{\text{пр.вн.}q} \right) \right], \quad (13)$$

где  $\dot{m}_x = \frac{dM_x}{d\tau}$  – массовая скорость химического взаимодействия или массовая скорость выгорания топливной смеси в объеме рабочего тела.

Неравновесный состав продуктов реакции обусловлен конечными скоростями протекания химических реакций, фазовых и полиморфных превращений. Определять его при известных давлении  $p$ , температуре  $T$  и составе топливной смеси  $\alpha_{ок}$ , а также термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания можно используя уравнения и соотношения формальной химической кинетики [3, 4, 5].

Скорость выделения тепла в процессе химического взаимодействия компонентов рабочего тела, включая фазовые и полиморфные превращения

$$\frac{dQ_x}{d\tau} = (I_T - I_{п.р}) \dot{m}_x, \quad (14)$$

где  $I_T$  и  $I_{п.р}$  – полные энтальпии топлива и продуктов реакции соответственно. Последняя определяется при температуре рабочего тела  $T$ .

Закон сохранения энергии применительно к рассматриваемому рабочему телу будем именовать первым началом термодинамики тела переменных массы и состава. Используя выражения (5), (6), (8) и (10), получим уравнение первого начала термодинамики для действующего элемента рабочего тела (см. рис.1)

$$dq + (I_T - I_{п.р.}) d\varepsilon_x + \sum_{i=1}^{\ell} (i_{пр.в.i} - i_i) \cdot d\varepsilon_{пр.в.i} + \\ + \sum_{q=1}^m (i_{пр.вн.q} - i_q) d\varepsilon_{пр.вн.q} = du + d\ell - p v (d\varepsilon_{пр.в.} - d\varepsilon_p), \quad (15)$$

где  $dq$  и  $d\ell$  – соответственно элементарные удельные контурно-контактная теплота и контурная работа.

Уравнение первого начала термодинамики тела переменных массы и состава для рабочего тела в целом запишется

$$dQ + (I_T - I_{п.р.}) dM_x + \sum_{i=1}^{\ell} (i_{пр.в.i} - i_i) dM_{пр.в.i} + \sum_{q=1}^m (i_{пр.вн.q} - i_q) \times \\ \times dM_{пр.вн.q} = dU + u dM + dL - pV (dM_{пр.в} - dM_p). \quad (16)$$

В термодинамике тела переменных массы и состава уравнения процессов возможно представлять в каноническом или расчетном виде.

В канонических уравнениях время в явном виде отсутствует, а в расчетных оно входит в качестве независимой переменной.

Из выражения (16), учитывая, что  $du = c_v dT$ , после необходимых преобразований получим расчетное дифференциальное уравнение изменения температуры рабочего тела

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{RT}{pVc_v} \left[ \frac{dQ}{d\tau} - \frac{dL}{d\tau} + (I_\tau - I_{п.р.}) \dot{m}_x + \sum_{i=1}^{\ell} (i_{пр.в.i} - i_i) \dot{m}_{пр.в.i} + \right. \\ \left. + \sum_{q=1}^m (i_{пр.вн.q} - i_q) \dot{m}_{пр.вн.q} + RT (\dot{m}_{пр.в.} - \dot{m}_p) \right]. \quad (17)$$

Продифференцировав по времени уравнение состояния, записанное для всего рабочего тела, и подставив в него вместо  $\frac{dT}{d\tau}$  выражение (17),

$$\text{получим расчетное уравнение изменения давления рабочего тела}$$

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{R}{c_v V} \left[ \frac{dQ}{d\tau} - \left(1 - \frac{c_v}{R}\right) \frac{dL}{d\tau} + (I_\tau - I_{п.р.}) \dot{m}_x + \sum_{i=1}^{\ell} (i_{пр.в.i} - i_i) \times \right. \\ \left. \times \dot{m}_{пр.в.i} + \sum_{q=1}^m (i_{пр.вн.q} - i_q) \dot{m}_{пр.вн.q} + T (R - c_v) (\dot{m}_{пр.в.} - \dot{m}_p) + \right. \\ \left. + c_v T \dot{m}_{пр.вн.} + \frac{c_v p V}{R^2} \frac{dR}{d\tau} \right], \quad (18)$$

Итак, совокупность полученных и упоминаемых выше уравнений позволяет рассчитывать изменение состояния рабочего тела переменной массы и переменного состава. Сведя объем рабочего тела к элементарному и проведя интегрирование системы дифференциальных уравнений в пространстве, можно рассчитывать процессы изменения состояния рабочего тела, имеющего различные параметры в пространстве.

Разработанный термодинамический метод расчета процессов с учетом изменения массы и состава рабочего тела в пространстве и во времени может найти широкое применение для расчета и анализа неустановившихся и переходных режимов работы различных энергетических установок и, прежде всего тепловых двигателей.

#### Список литературы

1. Мамонтов М.А. Вопросы термодинамики тела переменной массы. — М.: Оборонгиз, 1961.
2. Мамонтов М.А. Основы термодинамики тела переменной массы. — Тула: Приокское книжное изд-во, 1970.
3. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. — М.: Высш. шк., 1984.



4. Горение и течение в агрегатах энергоустановок: моделирование, энергетика, экология / В.Г. Крюков, В.И. Наумов, А.В. Демин, А.Л. Абдуллин, Т.В. Тринос. – М.: «Янус-К», 1997.
5. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник в 10 т. : Т.1. Методы расчета / под ред. акад. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1971.

## **КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ МЕТОДИК СТРУКТУРИЗАЦИИ ЦЕЛЕЙ И ФУНКЦИЙ**

Абрамова И.Г.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Критерием эффективности системы управления подготовки производства является достижение технико-экономических, научно-технических и других целей, ради которых создается автоматизированная, интегрированная система управления технической подготовки производства (ИСУТПП) или существует организационная структура управления. Критерий должен отражать возможность переработки качественно и с минимальными затратами весь объем информации, необходимый для выработки управленческих решений и своевременной их реализации. Количественное выражение критерия эффективности ИСУТПП должно строиться на основе конечных показателей деятельности и учитывать в тоже время затраты на содержание аппарата управления:

- Обеспечение качества изготовленной продукции за счет обеспечения технологической гибкости в рамках единого информационного пространства (для выполнения заказа без потерь по упущенной выгоде и поддержания конкурентоспособности продукции).
- Длительность цикла подготовки производства с учетом процесса согласования конструкторско-технологической документации должна быть минимальна.
- Затраты на аппарат управления подготовкой производства должны быть в соответствии с доходом от использования системы управления подготовкой производства.

Последний критерий может быть оценен эффективностью функционирования системы управления: